

素粒子物理学の展望

高エネルギー物理学研究者会議

2006年10月25日

素粒子物理学の現状

20世紀後半、実験と理論があいまって著しい展開が起こり、いわゆる「標準理論」が構築されるに至った。これによれば、物質を構成する基本粒子はクォークとレプトンであり、それらに働く3種類の力はゲージ原理に支配されている。標準理論は多くの実験によって高い精度で検証され、大きな成功を収めてきた。しかし、質量の起源となるヒッグス粒子はまだ発見されておらず、これは標準理論の支柱の一つが実験的に全く未検証のままであることを意味している。

また標準理論では、3つの相互作用が統一されておらず、重力相互作用はその枠に入っていない。更には、何故クォークやレプトンの種類(フレーバー)が3世代12種類存在し、異なる質量を持ち、異なる世代で混合しているのかという本質的な疑問が残っている。従って、標準理論は究極の理論とは考えられず、これを越えて素粒子物理学が如何なる方向に進んでいくかが今まさに問われている。

一方、最近の宇宙観測は、原子は宇宙のエネルギー組成の4%しか担っておらず、残りは暗黒物質(23%)や暗黒エネルギー(73%)と呼ばれる正体のわからないものであるという驚くべき事実を我々に突き付けた。暗黒物質は宇宙初期に生成され今まで生き残っていた相互作用の弱い粒子で、この粒子が重力によって宇宙のそこそこに集まり、銀河を形成する種となったと考えられている。また、現在宇宙の膨張速度は速まりつつある。この原因は「真空」のもっている暗黒エネルギーであり、アインシュタインが導入した宇宙項に対応すると考えられている。これらもゆくゆくは素粒子物理学で説明されるべき対象である。

エネルギーフロンティアの展開

2008年から衝突エネルギー14TeVで本格的に実験が始まるLHCでは、高いエネルギーの新物理を俯瞰する。次に続くILCでは電子・陽電子衝突のクリーンな環境での精密測定によって、その背後の物理法則を解きほぐし、以下に説明する素粒子物理学の新たなパラダイムを確立することが期待される。それは過去における反粒子の発見やゲージ原理の確立に匹敵するような大きな飛躍を意味する。

ゲージ対称性があると標準理論の全ての素粒子の質量はゼロであるが、この対称性を破り質量を生むのがヒッグス粒子の役割である。その質量はLEPなどの実験によって114 GeVから約200 GeVの間に絞られており、LHCでの発見が期待されている。ヒッグス粒子は初めてのスピンゼロの素粒子であり、その性質の解明は真空の構造や宇宙のインフレーション、暗黒エネルギーの理解への一歩となる。ILCではヒッグス粒子の生成と崩壊の精密測定を行ない、その量子数を決定し、他の素粒子との結合と自己結合を精度良く決定し、ゲージ対称性の破れが素粒子の質量の起源である事を解明する。ヒッグス粒子の性質を決定し、更に電弱対称性の破れの背後の物理を明らかにすることにより、標準理論を越える方向が示される可能性がある。

標準理論を越えた新たなパラダイムとして最も有望視されているのが「超対称性理論」である。超対称性の間接的な証拠は、(1)他の対称性によって守られていないヒッグスボソンの質量をこれによって軽く保てる、(2)強・電・弱3種類の相互作用が 10^{16} GeVという高い質量スケールで大統一できる、(3)最も軽い超対称性粒子は暗黒物質の有力な候補である、が挙げられる。超対称性が見つければ重力も含めた究極の統一理論である超弦理論へ有力な手掛かりが得られる。LHCでは比較的早期に超対称性粒子の証拠が発見できると考えられおり、ILCの到達エネルギーの範囲に超対称性粒子の閾値があれば、その生成・崩壊の精密測定からその性質の解明が行なわれ、軽い超対称性粒子が暗黒物質であるかを決定し、LHCの結果と併せて超対称性の破れの原因が解明できると期待される。

現在の素粒子物理学の知識からは、軽いヒッグス粒子が存在すると考えられている。また多くの研究者が TeV までに超対称性粒子が存在すると予想している。しかし、予想外の展開となる可能性もあり、特にヒッグス粒子の役割を担う全く異なる粒子や現象が発見されれば、実験と理論があいまって全く新たな物理学の地平が開かれるであろう。

フレーバー物理の展開

軽いヒッグス粒子が見つかり超対称性という大枠が決定しても、何故 3 世代 12 種類のクォークとレプトンが異なる質量を持ち、異なる世代で混合し CP の破れを生じるのかという本質的な疑問が残る。これに突破口を見出そうとするのがフレーバー物理である。標準理論の湯川項は実験によってしか決まらない多くのパラメータを含み、フレーバー混合のパラメータはそれに由来する。これらを精密に測定することが本質的な疑問に答えるために必要なステップとなる。

B ファクトリーでは、B 中間子系での大きな CP 非保存が発見され、クォークセクターのフレーバー混合の大枠が小林・益川理論で説明できることが最も精度良く検証された。B ファクトリーのアップグレードでは、レプトンコライダーというクリーンな環境においてフレーバー物理の基本的データを精度を上げて収集していくことによって、標準理論からのずれを探索する。ずれが発見されれば、標準理論を越える物理の効果が明らかになり、更にエネルギーフロンティアでは検出できない新しい物理にも到達できる可能性がある。特に、現在測定精度が不十分な $b \rightarrow s$ 遷移の精密測定により超対称性などに起因する CP 非保存や右巻カレントが探索できる。また、B 中間子の崩壊で荷電ヒッグス粒子の効果を検出できる可能性もある。更に、 $\tau \rightarrow \mu \gamma$ に代表されるレプトンフレーバーの破れが発見できれば、 $\mu \rightarrow e \gamma$ や $\mu \rightarrow e$ 転換などとともに、荷電レプトンの混合という全く新しい物理が展開でき、超対称性とシーソーニュートリノ機構の間接的な証拠を得る道が開ける。加えて、 $b \rightarrow s$ クォーク混合との関連を探索出来れば、大統一への知見が得られる。

一方、SuperKamiokande でのニュートリノフレーバー混合の発見は、ニュートリノにも質量があるという事実を明らかにしただけでなく、その質量(差)が非常に小さいことを示し、シーソー理論を仮定すれば、非常に高いエネルギースケールの存在を示唆した。また、クォークのフレーバー混合のパターンとニュートリノのそれが全く異なっている事もわかった。T2K 実験などでの θ_{13} の精密測定によって θ_{13} を決定し、その値が余り小さくないことがわかれば、ニュートリノのセクターでも CP 非保存を発見できる道が見つかる。ニュートリノの物理は、更に、(1) ニュートリノが Dirac 粒子か Majorana 粒子かの決定、(2) 質量の最小値の決定、(3) 質量階層の順番の決定、が重要な物理として残されている。

フレーバー構造の起源を解明するには、大統一の質量スケールの物理を理解する事が鍵であると考えられる。将来、精密測定による基本的なデータが出そろい、超対称性の破れの原因などが解明され、陽子の崩壊モードが明らかにされていくうちに、理論的にも突破口が見出される可能性がある。また、宇宙の反粒子が消えた謎を解明するにはこれらの研究が基礎となる。

素粒子物理学の今後の方向

素粒子物理学においては、エネルギーフロンティアでの実験によって TeV 領域の新粒子や新現象を生成し、そこに横たわる基本法則を解明することが最も重要である。特に、長年の懸案であった「ヒッグス粒子」と「超対称性粒子」の直接生成と精密測定によって物理の大枠を決定し、その背後にある新しい物理法則を解明して新たなパラダイムを開く。

フレーバー物理においては、クォークやレプトンのフレーバー混合等の基本的パラメータを精密に測定し、標準理論を越える物理を明らかにしていく。更に、エネルギーフロンティアの実験では到達できない高いエネルギーの物理を間接的に解明する。

また、素粒子物理学は宇宙の開闢や未来のより深い理解にも繋がると期待される。

日本の高エネルギーコミュニティの方針

- 日本の高エネルギーコミュニティは、エネルギーフロンティアの物理が最も重要であるとの認識の元に、ILC の実現を最優先課題とし、ILC の実験開始以前においては、エネルギーフロンティアと相補的な役割を担うフレーバー物理を共に推進するというマスタープランを成し遂げる。
- ILC とフレーバー物理実験を支える広範な加速器技術において日本は世界をリードしている。国際共同計画である ILC を実現するため、日本のリードする技術を更に工業化の段階にまで高めるべく、これまでのエネルギーフロンティアとフレーバー物理の両方の加速器研究開発を統合し、ILC 加速器技術の開発を本格化する。
- 日本では、ニュートリノ長基線実験を世界で初めて成功させ、KEKB ファクトリーは世界最強ルミノシティでの性能を向上し続け、更に J-PARC が間もなく完成する。これらの実績を活かし、J-PARC におけるニュートリノや K 中間子等の実験を成功させ、更に B ファクトリーのアップグレードによってルミノシティの飛躍的向上を図り、b, c, τ などのフレーバーに現れる新しい物理を探究する。
- 今日、国内外の多くの素粒子実験や加速器建設が国際協力によって推進されている。上記のプロジェクトを推進するために、今後更に国際化を図り、アジア諸国をはじめとする世界各国との連携を深める。

当面の課題

エネルギーフロンティアの物理:LHC 実験の成功を目指す。ILC の建設に向けた研究開発(特に量産技術の確立と工業化)を推進し、研究開発体制の増強を図る。

フレーバーの物理:J-PARC を完成させ、T2K や K 稀崩壊実験等を推進する。KEKB をアップグレードし、世界をリードする成果を挙げ続けると共に、ILC の開発にも活用する。

ILC と KEKB はレプトンコライダーとしての共通性が高いため、加速器・物理共に人的・物的資源を共有し、更に一体となって推進する体制を作る。

「素粒子物理学の展望」は高エネルギー委員会で作成し、
2006年10月25日開催の高エネルギー物理学研究者会議
総会で協議の上、全会一致で承認された。

高エネルギー委員

飯嶋 徹 (名古屋大学)
生出 勝宣 (KEK)
駒宮 幸男 (東京大学)
徳宿 克夫 (KEK)
中家 剛 (京都大学)
野崎 光昭 (KEK, 委員長)
羽澄 昌史 (KEK)
幅 淳二 (KEK)
日笠 健一 (東北大学)
山下 了 (東京大学)
山中 卓 (大阪大学)

作成協力者

岡田 安弘 (KEK)
濱口 幸一 (東京大学)